

## 天然素材分離プロセスの技術開発

その他（別言語等） のタイトル	Separation process development of natural materials
著者	大平 勇一，小幡 英二，木下 修，小川 和之
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	20
ページ	37-40
発行年	2009-12
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009091">http://hdl.handle.net/10258/00009091</a>

# 天然素材分離プロセスの技術開発

大平 勇一<sup>\*1</sup>, 小幡 英二<sup>\*1</sup>, 木下 修<sup>\*2</sup>, 小川 和之<sup>\*3</sup>

## Separation process development of natural materials

Yuichi Ohira<sup>\*1</sup>, Eiji Obata<sup>\*1</sup>, Osamu Kinoshita<sup>\*2</sup>, Kazuyuki Ogawa<sup>\*3</sup>

### 1 はじめに

本報は、ホエータンパクなどの天然素材物質を製品化するための濃縮する装置開発を行うにあたり、濃縮物製造用装置の規模・性能・価格を調査する必要がある。本研究では生乳処理量 1 t/d（チーズ製造量 100 kg/d に相当）のチーズ工房をモデルとして、分離工程、乾燥工程について物質収支をとり、それに基づく濃縮装置のホエータンパク分離工程について検討を行った。

### 2 基本的調査事項

#### 2.1 チーズ製造工程

一般的なチーズ製造の概要を次に示す。

##### (1) 低温殺菌

生乳を加熱し、温度 65℃で 30 分間維持することで殺菌を行う。その後、速やかに冷却する。

##### (2) カード製造

再び加熱し、乳酸菌を添加する。その後、凝乳酵素であるレンネットを添加し、カードを製造する。

##### (3) ホエー分離

攪拌などを行い、カード内からホエーを抜く。その後、カードを取り出し、ホエーと分離する。

##### (4) 加塩・成形・熟成

カードに加塩を行い、型詰めする。これを加圧した後、熟成させる。

<sup>\*1</sup> くらし環境系領域

<sup>\*2</sup> エコ・クリーン(株)

<sup>\*3</sup> (株)小川アドバンテック複合技術研究所

Table 1 チーズホエーの代表的組成

水	846	kg
固形分	54	kg
ホエータンパク質	8.1	kg
乳糖	41.6	kg
灰分	4.3	kg

#### 2.2 チーズホエー量と組成

モデル的なチーズ工房の生乳処理量として 1 t/d を設定する。これは 1 日あたりのチーズ製造量 100 kg に相当する。カード製造工程において、1 t/d の生乳から 100 kg/d のカードが製造され、ホエー発生量は 900 kg/d となる。ホエーの代表的な組成を Table 1 に示す。ホエー中の固形分は 54kg(6%)であり、94% は水である。固形分 54kg の内訳はタンパク質 8.1kg, 乳糖 41.6kg, 灰分 4.3kg である。

#### 2.3 既存システム

市場には「濃縮ホエー」、「乾燥ホエー」が既に流通している。「濃縮ホエー」とは成分組成をそのままに水分を減少させたものを言い、「乾燥ホエー」とは成分組成をそのままに水分を取り除いたものを言う。

現在、一部のホエーは肉質改善などの目的で養豚に用いたり、乾燥ホエーはスキムミルクの増量剤として用いられているが、需要に対して供給が過剰な状態であり、その多くが廃棄物として処分されている。ホエーに含まれている乳糖は人によっては消化不良などをおこす原因となる。製品の付加価値を高めるためには乳糖を除去する必要がある。

## 2.4 ホエーに含まれている物質の分子量

ホエーに含まれている物質のうち、乳糖は分子量が 342、タンパク質は分子量が 10,000 以上である。灰分はミネラルであり、式量は大きくても百数十程度と予想される。

## 2.5 目標品質

ホエータンパク質の目標組成は、タンパク質 85%、乳糖 10%、灰分等 5%である。ホエータンパク質の回収率を 100%、分離膜による乳糖および灰分の排除率は 0%と仮定すると、900 kg のチーズホエーから得られるホエー濃縮物の量は Table 2 のようになる。Tables 1, 2 より、分離工程での目標となる乳糖除去率は 97.6%と計算される。

Table 2 ホエータンパクの目標組成

ホエータンパク質	8.1 kg
乳糖	1.0 kg
灰分	0.1 kg
計	9.2 kg

## 3 概念設計

チーズホエーは Table 1 に示したとおり、タンパク質、乳糖、灰分、水からなる。今回回収対象とするのはタンパク質である。Table 2 に示した目標とする組成を実現するためには、乳糖、灰分、水を除去する必要がある。これらの除去を行うには乳糖と灰分を分離するための工程、水を除去する乾燥工程を設ける必要がある。Fig.1 にホエー処理装置の各工程での物質収支を示す。目標とする組成を実現するためには分離工程の最適化が最重要課題である。

## 4 分離工程

乳糖は分子量 342、タンパク質は分子量 10000 以上であるため、これらを分離するには分画分子量 5000 程度の濾過膜を使用すればよい。Fig.2 に分画分子量と孔径の関係を示す。分画分子量 5000 の場合、濾過膜の孔径は 2~3 nm のものを選定すればよい。濾過にはデッドエンド型とクロスフロー型がある。デッドエンド型濾過は小規模の回分濾過に適しているが、時間の経過とともに濾過膜上にケーキ層が形成され、このケーキ抵抗によって濾過流量が小さくなる。濾過流量を一定に維持するには、時間の経過とともに濾過圧力を大きくする必要がある。一方、クロスフロー型濾過は連続処理に向き、小規模から大規模まで対応することが容易である。液のせん断応力を利用して濾過膜上でのケーキ層形成を抑えることが可能であるが、形成したケーキは除去が困難であり、逆洗もしくは酸・アルカリ洗浄を行う必要がある。また、モジュールにはポンプを用いてホエーを圧送する必要がある。濾過の基本となる理論は Ruth の濾過方程式である。



Fig.1 ホエー処理装置の物質収支

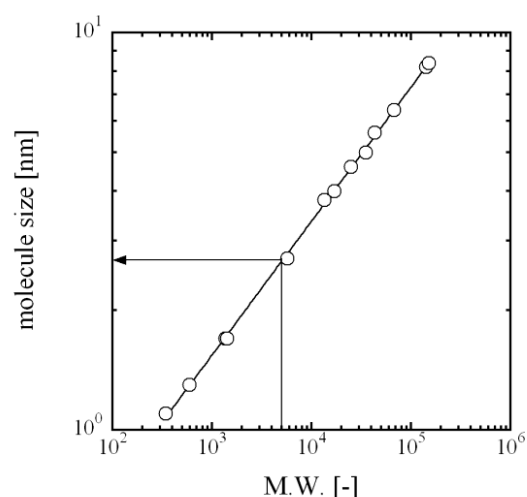


Fig.2 分画分子量と孔径の関係

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c)}$$

ここで、 $V$  は濾液量[m<sup>3</sup>]、 $A$  は濾過膜面積 [m<sup>2</sup>]、 $t$  は時間 [s]、 $\Delta P$  は圧力差 [Pa]、 $\mu$  は液粘度 [Pa・s]、 $R_m$  は濾材抵抗 [1/m]、 $R_c$  は濾材上に堆積したケーキ層の抵抗 [1/m] である。装置選定を行うにあたって、最終的に必要となる情報は濾過膜面積  $A$  である。これを求めるために Ruth の濾過方程式を用いる。濾過流量  $dV/dt$  は希望する処理時間によって決まり、

処理液の液粘度を測定するか液温度を測定することによって液粘度  $\mu$  が決まる。圧力差  $\Delta P$  は本来濾過膜の強度などによって決まるが、分画分子量 5000 程度の濾過膜であれば通常は 0.2–0.3 MPa 程度である。未知パラメータである濾材抵抗  $R_m$  とケーキ抵抗  $R_c$  は実験により求める必要がある。しかし、多くの場合、濾材抵抗  $R_m$  はカタログ記載の水透過速度から推算が可能である。このデータが記載されていない場合でも、濾材抵抗  $R_m$  はケーキ抵抗  $R_c$  に比べて 2 桁以上小さくなることが多いため、実験によりケーキ抵抗  $R_c$  を求めることができれば  $R_m$  の測定は事実上不要ことが多い。

そこで、濾過圧力 0.2 MPa, 20 °C で水を用いた実験を行った。定常状態での濾過流束  $J$  と濾過圧力  $\Delta P$  の関係から濾材抵抗  $R_c$  は  $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  と求められた。次に、ペプトン水溶液を用いて濾過圧力 0.2 MPa, 20 °C で濾過試験を行った。水の場合と同様、定常状態での濾過流束  $J$  と濾過圧力  $\Delta P$  の関係からケーキ抵抗  $R_c$  を求めると  $6 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  であった。実験の結果、ケーキ抵抗  $R_c$  は濾材抵抗  $R_m$  の 300 倍である ( $R_m \ll R_c$ )。よって、本実験系では、Ruth の濾過方程式を次のように近似することができる。

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c)} \approx \frac{\Delta P}{\mu R_c}$$

## 5 濾過操作方法

Fig.1 のプロセスに基づく、濾過による分離工程で乳糖を除去する際に水を 827 kg 除去しなければならない。これによって、得られるタンパク質水溶液は固形物濃度が質量パーセント濃度で 33% と非常に高濃度になる。この濃度のタンパク質水溶液が実現できたとしても粘性が高い流体となるため、Ruth の濾過方程式から透過流速が小さくなる。これは濾過膜面積を大きくする必要があること、送液ポンプ性能を上げる必要があることを示しており、初期設備投資額の増加を意味する。また、濾過流速を維持できるのは初期体積の 25% (水除去率 75%) 程度までである。目標とする品質を実現する (水除去率 97.6%) には初期体積の 2.4% まで濃縮しなければならないため、除菌水を加えて乳糖を希釈しながら濾過を行う必要がある。これを踏まえて Fig.3 に加水を組み込んだプロセスフローと物質収支を示す。ホエー 900 kg を処理するために総量約 3 t の加水を行いながら処理するダイヤフィルトレーションによってホエーに含まれる乳糖を目標値まで減少させることができる。しかし、ほぼ同量の乳糖廃液が発生する。

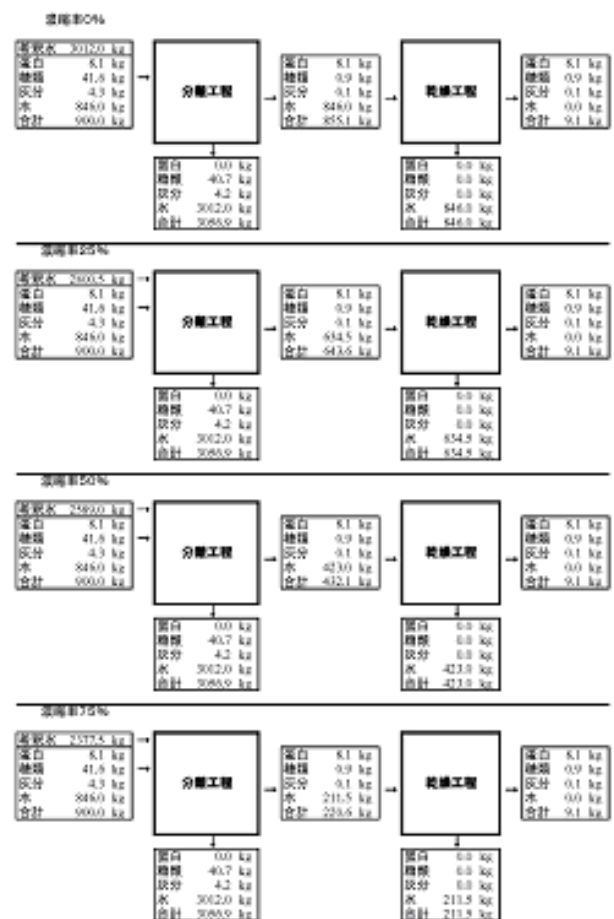


Fig.3 ダイヤフィルトレーションシステムの場合の物質収支

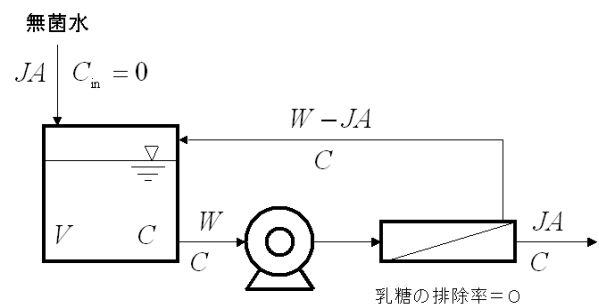


Fig.4 濾過システムのモデル

## 6 ダイヤフィルトレーションの濾過流量

ホエーをダイヤフィルトレーションで処理する場合、ホエー中の乳糖濃度は次の微分方程式で表すことができる。

$$\frac{d(VC)}{dt} = (W - JA)C - WC$$

ここで、 $V$  は液体積、 $C$  は乳糖濃度、 $t$  は時間、 $W$  は

循環液流量,  $J$  は濾過流速,  $A$  は濾過面積である。体積  $V$ , 濾過面積, 濾過流速  $J$  は時間に対して一定であると仮定して, 時刻 0 で乳糖濃度が  $C_0$  の条件で積分すると次式が得られる。

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{JA}{V}t$$

となる。前述のプロセスフローから, チーズホエーに含まれている乳糖量は 41.6 kg であり, 分離処理後の乳糖量は 0.9 kg である。液質量が 900 kg であることから, 液体積  $V$  は 0.9 m<sup>3</sup> とみなすことができる。分離工程に要する時間を 1 h としたい場合, 濾過流量  $JA$  が次の値になるように操作圧力  $\Delta P$ , 濾過面積  $A$ , 操作温度を決定すればよい。

$$JA = -\frac{V}{t} \ln \frac{C}{C_0} = -\frac{(0.9)}{(1)} \ln \frac{(0.9)}{(41.6)} = 3.45 \text{ m}^3/\text{h}$$

## 7 必要濾過面積

濾過圧力 0.2 MPa, 20 °C での濾過流速  $J$  を Ruth の濾過方程式で計算すると,

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_c} = \frac{(0.2 \times 10^6)}{(1 \times 10^{-3})(6 \times 10^{13})} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0.012 \text{ m/h}$$

となる。よって, 分離工程に要する時間を 1 h としたい場合, 必要な濾過面積  $A$  は,

$$A = \frac{3.45 \text{ m}^3/\text{h}}{0.012 \text{ m/h}} = 288 \text{ m}^2$$

となる。温度を 50 °C で濾過する場合, 液粘度は 0.55 mPa・s である。温度が変化してもケーキ抵抗  $R_c$  が変化しないと仮定し, 圧力差 0.2 MPa で操作する場合の濾過速度  $J$  を求めると,

$$J = 6.1 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 0.022 \text{ m/h}$$

となる。温度を変えても処理時間 1 h で処理したい場合は, 濾過流量  $JA$  の計算は変わらない。よって, 50 °C の場合の必要膜面積  $A$  は,

$$A = \frac{3.45 \text{ m}^3/\text{h}}{0.022 \text{ m/h}} = 157 \text{ m}^2$$

となる。50 °C の場合の必要膜面積は 20 °C の場合のそれよりも小さいで済む。以上と同様の計算を行うことで求めた温度 20 °C における処理時間  $t$  と必要濾過面積  $A$  の関係を Fig.5 に実線で示す。同図中には 50 °C の場合について同様に計算した結果を破線で示した。同一の膜面積の場合, 温度が高いほど分離に要する時間は短くなる。このことから, チーズホエーを処理する際, ホエーの温度が低下しないよ

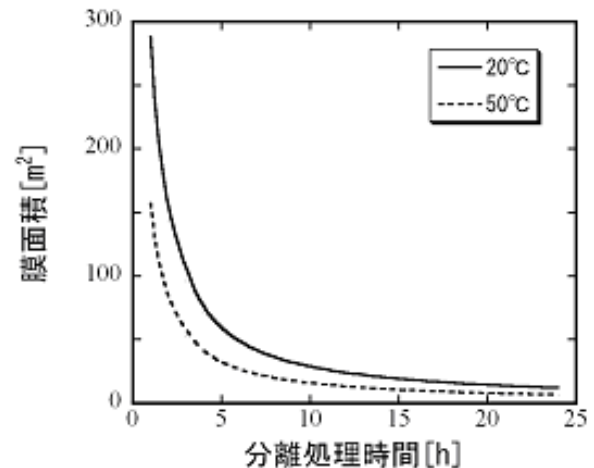


Fig.5 分離処理時間と必要膜面積の関係

うな容器構造にすることで処理時間を早くすることも可能である。

## 8 システム価格

検討結果に基づき, 2 社に分離工程の見積もりをお願いした。その結果, A 社からは 1,000 万円(車上渡し, 濾過装置のみ), B 社からは 2,300 万円(車上渡し, 貯水槽などの周辺機器類含む)が提示された。

## 9 終わりに

濃縮装置の物質収支に基づき, 特に乳糖とタンパク質の分離工程について検討した。その結果, 次のことがわかった。

- ・ホエー中の乳糖とホエータンパクを分離する操作として濾過操作を適用する場合, 濾過膜は分画分子量 5000, もしくは孔径 2 nm 程度とする。
- ・濾過操作を行うにあたり, 最終要求品質を満たすにはダイヤフィルトレーションシステムで処理する必要がある。
- ・処理ホエー 900 kg あたり約 2~3 t の無菌水が必要であり, 濾過操作後, 約 3 t の乳糖廃液が発生する。
- ・濾過のみによる濃縮は困難であり, 減圧濃縮などの工程を組み込む必要がある。
- ・周辺機器類が整備された施設に濾過装置を導入する場合, 設備費は約 1,000 万円となる。
- ・周辺機器類が整備されていない施設に濾過装置を導入する場合, 設備費は約 2,300 万円となる。